自成靶中子管中子产额的模拟研究

陶应龙[12]　梁参军[12]　常博[12]　郝丽娟[12]　凤麟核团队
1（中科石金（安徽）中子技术有限公司　合肥　230031）
2（中子科学国际研究院　山东青岛　266199）

摘要　自成靶中子管具有高耐温、高稳定性和长寿命的优点，在核测井领域的应用前景广阔。开展自成靶中子管中子产额模拟研究，可为中子管物理设计提供依据。基于 TARGET 程序，利用厚靶条件下 D-T 反应积分中子产额与 T-D 反应积分中子产额的关系，建立了一种 T-D 反应的等效模拟方法，实现了自成靶中子管中子产额的模拟计算。利用该方法，计算并分析了自成靶中子管束流参数和靶参数对中子产额的影响。结果表明，当入射束流的 D、T 混合比例为 1:1 时，自成靶中子管的中子产额取到最大值，增加或减小 D 的占比都会降低中子产额；靶原子比、束流能量、束流的单原子离子占比等参数与中子产额正相关，要提高自成靶中子管的中子产额，应在中子管设计限制条件下尽可能提高以上参数。

关键词　自成靶中子管；D-T 反应；T-D 反应；中子产额
中图分类号　TL99
DOI:

Simulation of neutron yield in the neutron tube with a drive-in target

Tao Ying-Long[12]　Liang Can-Jun[12]　Chang bo[12]　Hao Li-Juan[12]　FDS Consortium[2]
1(*Thinking Neutron Technology Co., LTD, Heifei 230000, China*)
2(*International Academy of Neutron Science, Qingdao 266199, China*)

Abstract　**[Background]**: The neutron tube with a drive-in target has the advantages of high temperature resistance, stability, and long lifespan. It holds great potential for applications in the field of nuclear logging. **[Purpose]**: Research on simulating neutron yield from a neutron tube with a drive-in target can serve as a foundation for the physical design of such tubes. However, there is currently no numerical simulation tool available for simulating the desired reaction in a drive-in target neutron tube. **[Methods]**: Based on the TARGET program, an equivalent simulation method of T-D reaction is established by using the relationship between the integral neutron yield of D-T reaction and the integral neutron yield of T-D reaction under thick target condition. **[Results]**: Using this method, the effects of beam parameters and target parameters on neutron yield are calculated and analyzed. **[Conclusions]**: The results indicate that when the mixing ratio of D and T in the incident beam is 1:1, the neutron yield of the neutron tube with a drive-in target reaches its maximum value. Increasing or decreasing the proportion of D will result in a decrease in neutron yield. The parameters such as target atom ratio, beam energy, and single atom ion ratio are positively correlated with neutron yield. To enhance the neutron yield of a neutron tube with a drive-in target, it is advisable to maximize these parameters within the design constraints of the tube.

Key words　Neutron tube with drive-in target; D-T reaction; T-D reaction; Neutron yield

安徽省科技重大专项(201903c08020003)资助
第一作者：陶应龙，男，1982 年出生，2011 年于清华大学获博士学位，研究领域是核技术应用
通讯作者：梁参军，E-mail: canjun.liang@fds.org.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

随着社会的进步，健康、安全和环境（HSE）受到越来越广泛的重视。在核测井中，同位素化学源对环境及人员具有放射性危害，应用受到限制[1]。可控中子源可以通过电子线路控制中子的发射与关闭，绿色、环保，正在逐步替代同位素中子源[1-2]。可控中子源包括 D-T 中子源及 D-D 中子源，但是 D-D 中子源的产额和能量较低，因而 D-T 中子源是目前常用的可控中子源[3]。

D-T 中子管是可控中子源的关键部件。D-T 中子管将离子源、反应靶、加速系统、存储器等密封在陶瓷或玻璃管内，形成一种通电可控的微型加速器中子源[4]。按照反应靶的类型，可以分为预制靶中子管和自成靶中子管。其中，自成靶中子管采用 D、T 混合束流打靶，与自成靶内的 D、T 原子发生聚变反应，释放出 14MeV 中子和少量 2.5MeV 中子，其中 14MeV 中子主要产生于 D-T 反应和 T-D 反应。自成靶中子管具有高耐温、高稳定性和长寿命的优点，可以满足中子测井对中子源的需求，一直被人们所青睐[5-6]。

中子产额是衡量 D-T 中子管性能的关键指标之一。为了分析 D-T 中子管的中子产额，通常采用理论计算或者蒙特卡罗模拟。Verbeke J M 给出了厚靶条件下 D-T 反应和 T-D 反应中子产额的理论积分公式[7]，姚泽恩、岳伟明等人将厚靶分割成许多足够薄的薄层，实现了 D-T 中子产额的数值计算[8-11]。以上基于中子产额积分公式的计算，不考虑入射离子在靶中的散射和扩散等物理过程，计算结果的精度有限。董晨阳采用 GENAT4 模拟了 D-D 反应过程[12]，验证了通用蒙特卡罗程序模拟中子管束靶反应的可行性，但由于 GENAT4 模拟三维的离子输运过程，为获得较高的精度，需要的计算量很大，耗时较长。TARGET 是模拟聚变中子产生、输运和散射过程的专用蒙特卡罗程序[13]，目前常用 TARGET 来模拟中子管的中子源参数[14-16]。不足之处是，TARGET 程序的入射离子仅包含质子和氘离子，不包含氚离子，可以模拟 D-T 反应，但不能模拟 T-D 反应，因此不能进行自成靶中子管的模拟。

为了解决自成靶中子管的模拟问题，本文基于 TARGET 程序建立了一种 T-D 反应的等效模拟方法，实现了自成靶中子管中子产额的模拟，并计算分析了自成靶中子管的束流参数和靶参数对中子产额的影响，对自成靶中子管的设计具有参考意义。

1 自成靶中子管

自成靶中子管是一种使用自成靶的密封 D-T 中子管。其工作原理[17]是，先将氘氚混合气体注入到中子管中，然后由离子源将其电离为氘、氚离子，再经引出系统引出后轰击到靶上，将氘、氚注入进空白靶。经过一段时间后，靶内的氘、氚含量逐渐饱和，从而形成自成靶。自成靶中子管不需要预先对靶进行吸氚，因此具有更好的稳定性和更长的使用寿命。

自成靶中子管在工作时，加速的 D、T 混合离子束流，与靶内已有的 D、T 原子发生聚变反应，产生 14MeV 中子和少量 2.5MeV 中子。束流与靶的相互作用包括 4 个反应道，分别记为 D(d, n)3He、T(d, n)4He、D(t, n)4He、T(t, 2n)4He，简称 D-D、D-T、T-D 和 T-T 反应。其中，D-D 反应产生 2.5MeV 中子，D-T 和 T-D 反应产生 14MeV 中子。根据 ENDF/B-VII.1 氘、氚子数据库[18]，四种核反应的积分截面随入射离子能量的变化情况如图 1 所示。用于油气测井应用中的 D-T 中子管，体积小，靶压有限，这里只讨论束流能量低于 300keV 的情况。在 300keV 以下能量区间，D-D 和 T-T 反应截面远低于 D-T 和 T-D 反应，因此自成靶 D-T 中子管的模拟只需考虑 D-T、T-D 反应。

安徽省科技重大专项(201903c08020003)资助
第一作者：陶应龙，男，1982 年出生，2011 年于清华大学获博士学位，研究领域是核技术应用
通讯作者：梁参军，E-mail: canjun.liang@fds.org.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

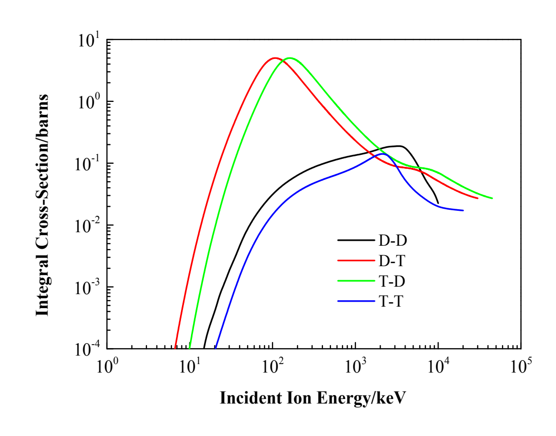


图 1　自成靶中子管束靶相互作用的积分截面

Fig. 1　Target reaction integral cross section of neutron tube bundle with drive-in target

2　T-D 反应等效模拟方法

对于自成靶中子管，D-T 反应可以利用 TARGET 程序进行模拟，而 T-D 反应，受 TARGET 程序功能限制，并不能直接模拟。针对 T-D 反应模拟问题，下面从厚靶条件下 D-T 和 T-D 反应中子产额的积分公式出发，推导出 D-T 和 T-D 反应中子产额的关系，并在此基础上建立了基于 TARGET 程序的 T-D 反应等效模拟方法。

在厚靶条件下，D-T 反应的积分中子产额 $Y_{\text{D-T}}(E_{\text{D}})$ 和 T-D 反应的积分中子产额 $Y_{\text{T-D}}(E_{\text{T}})$ 可由下式[7]计算

$$Y_{\text{D-T}}(E_{\text{D}})=\int_{E_{\text{D}}}^{0} I_{\text{D}} N_{\text{T}} \sigma_{\text{D-T}}(E)\frac{1}{S_{\text{D}}(E)}\text{d}E \tag{1}$$

$$Y_{\text{T-D}}(E_{\text{T}})=\int_{E_{\text{T}}}^{0} I_{\text{T}} N_{\text{D}} \sigma_{\text{T-D}}(E)\frac{1}{S_{\text{T}}(E)}\text{d}E \tag{2}$$

式中，I_{D}、I_{T} 为入射离子强度；N_{D}、N_{T} 为靶中 D 或 T 的原子数密度；$\sigma_{\text{D-T}}(E)$ 为 D-T 反应截面，$\sigma_{\text{T-D}}(E)$ 为 T-D 反应截面；$S_{\text{D}}(E)$ 和 $S_{\text{T}}(E)$ 为入射离子在靶中的阻止本领。

当 T^{+} 和 D^{+} 以相同的速度打靶时，T-D 反应和 D-T 反应的积分截面相等。此时，T^{+} 能量 E_{T} 与 D^{+} 能量 E_{D} 的关系为 $E_{\text{T}}=E_{\text{D}}\,m_{\text{T}}/m_{\text{D}}$。因此，$\sigma_{\text{D-T}}(E)$ 和 $\sigma_{\text{T-D}}(E)$ 的关系为

$$\sigma_{\text{T-D}}(E)=\sigma_{\text{D-T}}(E\,m_{D}/m_{T}) \tag{3}$$

根据 Bethe-Block 公式[19]，阻止本领只与入射离子的速度有关，而与它的质量无关。当 T^{+} 和 D^{+} 以相同的速度打靶时，阻止本领也相等，因此 $S_{\text{D}}(E)$ 和 $S_{\text{T}}(E)$ 的关系为

$$S_{\text{T}}(E)=S_{\text{D}}(E\,m_{D}/m_{T}) \tag{4}$$

将（3）和（4）代入到（2）中，得到

$$Y_{\text{T-D}}(E_{\text{T}})=\frac{m_{\text{T}} N_{\text{D}}}{m_{\text{D}} N_{\text{T}}} Y_{\text{D-T}}(E_{\text{D}}) \tag{5}$$

当 $N_{\text{D}}=N_{\text{T}}$ 时，代入 m_{T} 和 m_{D} 的值，可得

$$Y_{\text{T-D}}(E_{\text{T}})=1.5Y_{\text{D-T}}(E_{\text{D}}) \tag{6}$$

根据（6）式，即可建立基于 TARGET 程序的 T-D 反应中子产额等效模拟方法，实现步骤如下：a）先计算与入射 T^{+} 具有相同速度的 D^{+} 的能量；b）然后利用 TARGET 程序模拟等效 D^{+} 入射自成靶的 D-T 反应过程；c）将得到的中子产额再乘以 1.5 进行修正，即为 T-D 反应的中子产额。

为了验证（6）式的正确性，利用（1）式和（2）式进行数值计算，结果如表 1 所示。表中，$Y_{\text{T-D}}$ 是单

个 T^+入射自成靶的中子产额，$Y_{D\text{-}T}$是单个等效 D+入射自成靶的中子产额。在计算中，自成靶的靶膜厚度取 10μm，其中氘、氚、钛的原子比取 0.5:0.5:1，D-T 和 T-D 反应的截面按照图 1 取值，阻止本领使用 SRIM[20]程序计算。由表 1 的结果可见，$Y_{T\text{-}D}/Y_{D\text{-}T}$随入射 T^+的能量变化很小，约等于常数 1.5，与（6）式一致。

表 1　T-D 反应及等效 D-T 反应的中子产额
Table 1　Neutron yields of T-D reaction and equivalent D-T reaction

T^+ energy/keV	Yield of T-D reaction ($Y_{T\text{-}D}$)	Equivalent D^+ energy/keV	Yield of D-T reaction ($Y_{D\text{-}T}$)	Ratio of yields ($Y_{T\text{-}D}/Y_{D\text{-}T}$)
50	1.44E-07	33.39	9.67E-08	1.49
100	1.98E-06	66.77	1.32E-06	1.50
150	6.43E-06	100.16	4.30E-06	1.50
200	1.14E-05	133.55	7.63E-06	1.49
250	1.54E-05	166.93	1.03E-05	1.50
300	1.84E-05	200.32	1.23E-05	1.50

3　结果及讨论

根据上述方法，利用 TARGET 程序和以上 T-D 反应等效模拟方法，模拟计算了 D、T 混合束流垂直入射自成靶的中子产额，并分析中子产额与束流参数和靶参数的关系。在模拟中，靶膜材料采用钛，靶膜厚度取 10μm，氘氚原子在靶膜中均匀分布。D、T 混合束流的能量不超过 300keV，则束流离子的最大射程为 2.01μm，因此模拟满足厚靶条件。

3.1　束流的氘氚比例对自成靶中子产额的影响

为了比较入射束流的氘离子和氚离子所占比例对自成靶中子产额的影响，计算了束流中 D^+、T^+取不同比例时的中子产额，如图 2 所示。束流能量取 50keV、100keV 两种能量，靶膜中氘、氚、钛的原子比取 0.5:0.5:1.0。从图 2 可以看出，对于不同的束流能量来说，随着混合束流中 D^+的比例逐渐升高，中子产额呈现先增大后减小的趋势，并且在混合束流的 D^+占比为 50%时中子产额最大。这主要是因为束流中的氘氚比例和自成靶中的氘氚比例相等。

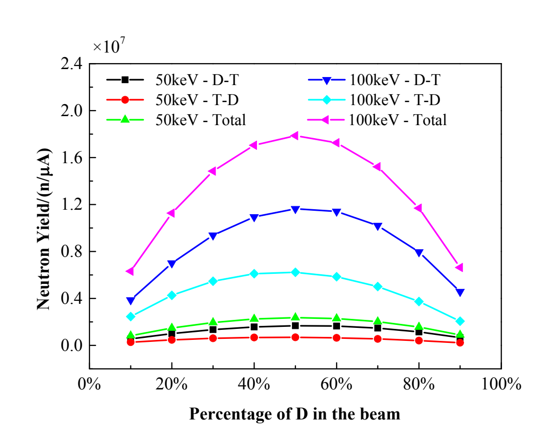


图 2　束流在不同氘氚混合比例条件下的中子产额
Fig. 2　The neutron yield of the beam under different deuterium-tritium mixing ratios

在（1）式中，束流的氘氚比例是通过改变 $I_D N_T$来影响中子产额。令混合束流强度为 I_0，靶膜中的氘、氚总原子数密度为 N_0，则 $I_0 = I_D + I_T$， $N_0 = N_D + N_T$，如果仅改变束流的氘氚比，I_0、N_0保持不变。由于束流中的氘氚比例和自成靶中的氘氚比例相等，则 $I_D / I_0 = N_D / N_0$， $I_T / I_0 = N_T / N_0$。假设 $I_D / I_0 = a$，则

$$I_D N_T = I_0 N_0 a(1-a) = I_0 N_0 \left[-\left(a-\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \right] \quad (7)$$

根据（7）式，$a=0.5$时，即混合束流中的D^+占比为50%时，$I_D N_T$取到最大值，对应D-T反应中子产额最大值。同理，混合束流中的D^+占比为50%时，$I_T N_D$也取到最大值，对应T-D反应中子产额最大值。这与图2的计算结果相符。

3.2 靶原子比和束流能量对自成靶中子产额的影响

靶原子比是指自成靶中的氘、氚原子数密度与钛原子数密度的比值，记为(D+T)/Ti。为了研究靶原子比对自成靶中子产额的影响，计算了钛靶在不同靶原子比条件下中子产额随束流能量的变化，如图3所示。在计算中，束流中D^+和T^+的比例按1:1取值，靶原子比分别取0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2。

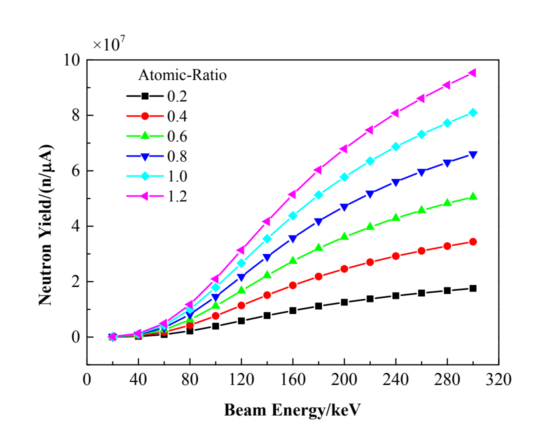


图3 不同靶原子比条件下中子产额随束流能量的变化
Fig.3 Variation of neutron yield with beam energy under different target atom ratios

从图3可以看出，中子产额随束流能量的变化曲线近似为S形曲线，单调递增，并且在曲线中段的增速最大。根据（1）式和（2）式，中子产额是对$\sigma_{\text{D-T}}(E)/S_D(E)$或$\sigma_{\text{T-D}}(E)/S_T(E)$的积分，由于积分项大于零，因此中子产额随着束流能量的增大而增大。而中子产额的增速，即曲线的斜率，取决于积分项的大小。由图1可知，D-T、T-D反应截面随着束流能量先增大后减小，峰值在100-200keV附近，正好对应图3中曲线斜率最大的中段。

从图中还可以看出，中子产额随靶原子比的增大而增大，近似呈线性关系。这是因为自成靶内的钛原子数密度是常数，提高靶原子比，等于增大N_D、N_T，同时也增大了靶中的总原子密度，从而使得阻止本领$S_D(E)$、$S_T(E)$有所增大。从（1）、（2）式可知，$Y_{\text{D-T}}(E_D)$与N_T成正比，$Y_{\text{T-D}}(E_T)$与N_D成正比，考虑到阻止本领的变化是次要因素，因此理论上中子产额与靶原子比近似成正比。

为进一步比较D-T反应和T-D反应对中子产额的贡献，计算了靶原子比在0.4、0.8、1.2三种条件下的D-T反应和T-D反应各自的中子产额，如图4所示。可见，束流能量在200keV以下，D-T产额大于T-D产额；束流能量在200keV以上，T-D产额反超D-T产额。这与D-T反应和T-D反应的积分截面相关。根据图1的截面数据，当束流能量E小于135keV时，$\sigma_{\text{D-T}}(E)$大于$\sigma_{\text{T-D}}(E)$，当E大于135keV时，$\sigma_{\text{D-T}}(E)$小于$\sigma_{\text{T-D}}(E)$。由（1）、（2）式，中子产额是对$\sigma_{\text{D-T}}(E)$或$\sigma_{\text{T-D}}(E)$的积分，在不考虑阻止本领等次要因素的条件下，当E小于135keV时，D-T产额及其增速均大于T-D产额及其增速；当E大于135keV且小于200keV时，D-T产额的增速低于T-D产额的增速，此时T-D产额开始追赶D-T产额；当E大于200keV时，T-D产额追上并超越D-T产额。

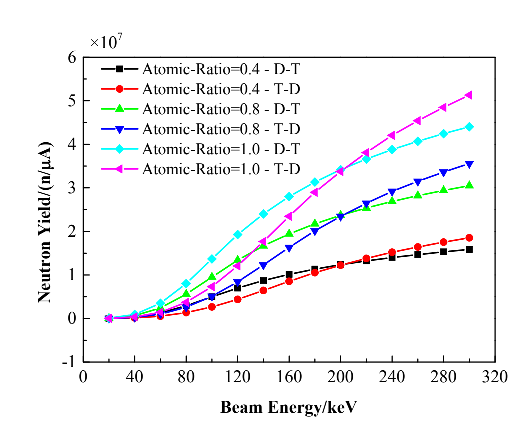


图 4 D-T 反应和 T-D 反应中子产额的比较
Fig. 4 Comparison of neutron yields between D-T reaction and T-D reaction

3.3 束流离子组成对自成靶中子产额的影响

中子管在实际工作中，混合束流的成分并不全是单原子离子（D^+、T^+），还包含双原子离子（D_2^+、T_2^+、DT^+）以及三原子离子（D_3^+、T_3^+、D_2T^+、DT_2^+）。由于占比小、速度慢等原因，三原子离子对中子产额的贡献比单原子离子和双原子离子小得多[7]，为了方便讨论，这里忽略了三原子离子。令束流中 D 和 T 的比例为 1:1，则单原子离子由 50%的 D^+和 50%的 T^+组成，双原子离子由 25%的 D_2^+、25%的 T_2^+和 50%的 DT^+组成，如表 2 所示。

表 2 束流离子组成
Table 2 Beam ion composition

离子类型 Ion type	离子成分 Composition of ions	反应类型 Reaction type	处理方法 Treatment method
单原子离子 Monatomic ion	D^+ 50%	D-T	
	T^+ 50%	T-D	
双原子离子 Diatomic ion	D_2^+ 25%	D-T	等效为 2 个 $E_0/2$ 的 D^{+*}
	T_2^+ 25%	T-D	等效为 2 个 $E_0/2$ 的 T^+
	DT^+ 50%	D-T、T-D	等效为 1 个 $2E_0/5$ 的 D^+和 1 个 $3E_0/5$ 的 T^+

*表中，E_0 表示束流能量，双原子离子等效为单原子离子的方法参考文献[7]。

为了模拟双原子离子，参考文献[7]的等效处理方法，在保持入射离子的总能量和速度不变的条件下，将双原子离子等效为若干个单原子离子进行模拟，如表 2 所示。图 5 为束流中单原子离子占比分别为 100%、80%、60%、40%、20%、0%时中子产额模拟结果。计算过程中，靶膜取 10μm 的厚靶，靶原子比(D+T)/Ti 取 1.0。由结果可见，随着束流能量的增大，不同离子组成条件下的中子产额均单调递增，且单原子离子的占比越大，中子产额越高。但是，也能看到当束流能量接近 300keV 时，不同单原子离子占比条件下的中子产额在不断接近，这是由于单原子离子和双原子离子的贡献量随着束流能量的增加此消彼长，参见下文图 6。

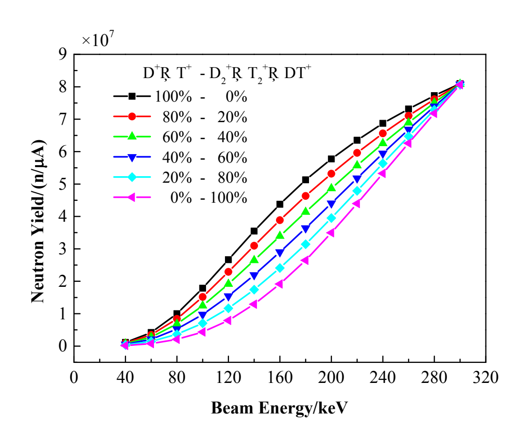


图 5 不同离子组成条件下的中子产额随束流能量的变化
Fig. 5 Variation of neutron yield with beam energy under different ion composition conditions

为了比较束流中不同离子成分的贡献，计算了单原子离子占比为 50%条件下各离子成分分别产生的中子产额，如图 6 所示。可见，在 280keV 以下，以单原子离子的贡献为主，并且 200keV 以下，D^+的贡献量大于 T^+离子的贡献量，而 200keV 以上，T^+离子的贡献量反超了 D^+的贡献量，这是因为 D^+的贡献量对应了 D-T 反应，T^+离子的贡献量对应 T-D 反应。对于双原子离子，D_2^+的贡献量比 T_2^+大，两者的贡献量之和与 DT^+的贡献量接近。

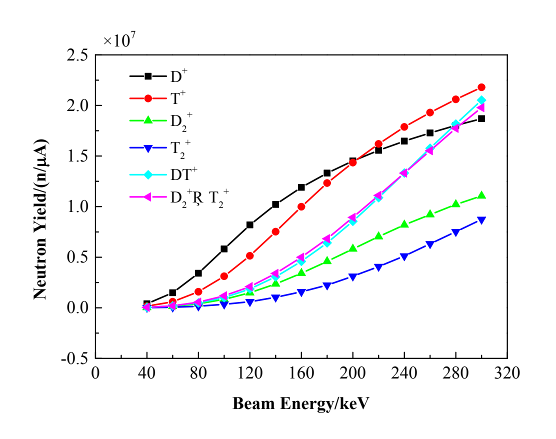


图 6 混合束流不同离子成分对中子产额的贡献
Fig.6 Contribution of different ionic components of mixed beam to neutron yield

4 结论

本文利用 T-D 反应中子产额与 D-T 反应中子产额的理论关系，建立了基于 TARGET 程序的 T-D 反应中子产额等效模拟方法，解决了自成靶中子管中子产额的蒙特卡罗模拟问题。利用该方法，计算并分析了中子管束流参数和靶参数对自成靶中子管中子产额的影响情况。首先，分析了入射束流中 D、T 混合比例对中子产额的影响。随着混合束流中 D 离子占比的增大，中子产额先增大后减小，并且在 D、T 混合比例为 1:1 时，中子产额取到峰值。TARGET 模拟结果和理论分析结果一致，验证了该结论的正确性。其次，分析了靶原子比和束流能量对自成靶中子产额的影响。模拟结果显示，中子产额与靶原子比近似成正比；中子产额随束流能量的变化曲线呈 S 形状，且在 100-200keV 区间增速较快。束流能量较低时，D-T 反应产额比 T-D 反应产额高；而 200keV 之后，T-D 反应产额反超了 D-T 反应产额。最后，分析了束流离子组成对自成靶中子产额的影响。束流离子包含单原子离子（D^+、T^+）和双原子离子（D_2^+、T_2^+、DT^+），在 300keV 以下，单个单原子离子的产额大于单个双原子离子的产额，所以单原子离子占束流的比例越高，中子产额就越大。

本文的模拟研究对自成靶中子管的物理设计具有参考意义。若要提高自成靶中子管的产额，应采用 1:1

的 D、T 混合束流入射自成靶，同时尽可能提高靶原子比、束流能量、束流的单原子离子占比等参数。

作者贡献声明 陶应龙负责理论推导、计算、分析数据及文章撰写；梁参军提出研究课题，对文章进行审阅及指导；常博对文章质量进行把关，负责公式推导复核、文字修改；郝丽娟对文章进行审阅及指导。

参考文献

1 BADRUZZAMAN A, SCHMIDT A, ANTOLAK A. An assessment of fundamentals of neutron porosity interpretation: Americium-Beryllium source versus neutron generator-based alternatives[C]//SPWLA 58th Annual Logging Symposium, Oklahoma City, USA, 2017.

2 张锋，田立立. 可控中子及 X 射线源测井技术发展现状及趋势[J]. 同位素，2019，**32**(03)：133-150. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030601.

ZHANG Feng, TIAN Lili. Research Development and Tendency of Controllable Neutron and X-Ray Source Well Logging Technology[J]. Journal of Isotopes, 2019, **32**(03): 133-150. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030601.

3 MONTARON B, HAN M. A connectivity model for the electrical conductivity of sandstone rocks[C]// The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts. SPWLA 50th Annual Logging Symposium, Texas, 2009.

4 魏宝杰，钟海明. 中子管及其应用技术[M]. 长春：东北师范大学出版社，1997.

Wei Baojie, Zhong Haiming. Neutron tube and its application technology[M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1997.

5 郤方华，王建民，王志全等. Φ25 测井用微型自成靶中子管 [J]. 测井技术，2014，38(01)：86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1338.2014.01.014.

XI Fanghua, WANG Jianmin, WANG Zhiquan, et al. Φ25 micro drive-in target neutron tube for well logging tool[J]. Well Logging Technology, 2014, **38**(01): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1338.2014.01.014.

6 宋应民，杨洪广，张家善等. 用于中子测井的自成靶密封中子管性能评价 [J]. 同位素，2014，**27**(04)：199-202. DOI: 10.7538/tws.2014.27.04.0199.

SONG Yingmin, YANG Hongguang, ZHANG Jiashan, et al. The parameters test of a sealed D-T logging neutron tube[J]. Journal of Isotopes, 2014, **27**(04): 199-202. DOI: 10.7538/tws.2014.27.04.0199.

7 VERBEKE J M, LEUNG K N, VUJIC J. Development of a sealed-accelerator-tube neutron generator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B，2000，53：801−809.

8 姚泽恩，岳伟明，罗鹏等. 厚靶 T(d,n)~4He 反应加速器中子源的中子产额、能谱和角分布[J]. 原子能科学技术，2008，**42**(05)：400-403.

YAO Zeen, YUE Weiming, LUO Peng, et al. Neutron yield , energy spectrum and angular distribution of accelerator based T(d , n)^{4}He reaction neutron source for thick target[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(05): 400-403.

9 岳伟明，姚泽恩，杜洪新等. T(d,n)~4He 强流中子发生器的中子能谱和角分布模拟计算[J]. 原子能科学技术，2008，42 (12)：1073-1076.

YAO Zeen, YUE Weiming, LUO Peng, et al. Neutron yield , energy spectrum and angular distribution of accelerator based T(d , n)^{4}He reaction neutron source for thick target[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(05): 400-403.

10 杨振，龙继东，蓝朝晖等. 离子源及厚靶参数对氘氚反应中子源中子产额的影响[J]. 核技术，2012，**35**(08)：591-595.

YUE Weiming, LONG Jidong, LAN Chaohui, et al. Simulation calculation of neutron energy spectrum and angular distribution for T(d,n)^{4}He intense neutron generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **35**(08): 591-595.

11 韦峥. 强流中子发生器中子源特性模拟及快中子诱发锕系核素裂变物理研究[D]. 兰州大学, 2016.

WEI Zheng. Simulation of Neutron Source Characteristics for Intense Neutron Generator and Physical Study on the Neutron-induced Actinide Nuclei Fission[D]. Lanzhou University, 2016.

12 董晨阳. D-D 中子发生器中子产额及能谱分析[D]. 西南科技大学, 2021.

DONG Chenyang. The yield and energy spectrum analysis of D-D neutron generator[D]. Southwest University of Science and

Technology, 2021.

13 Dietrich Schlegel. Target user’s manual[R]. PTB-6.42-05-2，Braunshweig，2005.

14 王黎明. 高压倍加器 14MeV 实际中子场研究[D]. 中国原子能科学研究院，2007.

Wang Liming. Study of 14MeV neutron field generated by a high pressure multiplier[D]. China Institute of Atomic Energy, 2007.

15 聂阳波，鲍杰，阮锡超等. 准直 D-T 中子束穿过大块板状聚乙烯样品积分实验 [J]. 原子能科学技术，2012，46(12): 1486-1491.

NIE Yangbo, BAO Jie, RUAN Xichao, et al. Integral Experiment of Large Slab Polyethylene Samples with 14.8MeV Collimated Neutron Beams Collimated Neutron Beams[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, **46**(12): 1486-1491.

16 秦建国，赖财锋，鹿心鑫等. 基于固体靶的 D-T 和 D-D 中子源特性模拟计算[J]. 核动力工程，2017，**38**(S1)：8-12. DOI: 10.13832/j.jnpe.2017.S1.0008.

QIN Jianguo, LAI Caifeng, LU Xinxin, et al. Monte Carlo calculation for D-T and D-D reaction neutrons based on solid target[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, **38**(S1): 8-12. DOI: 10.13832/j.jnpe.2017.S1.0008.

17 郤方华，王建民，王志全等. 175℃自成靶中子管的结构设计和指标测试 [J]. 测井技术，2011，35(06)：585-588. DOI: 10.16489/j.issn.1004-1338.2011.06.021.

XI Fanghua, WANG Jianming, WANG Zhiquan, et al. Structural design and performance index test of 175℃ neutron tube with drive-in target[J]. Well Logging Technology, 2011, **35**(06): 585-588. DOI: 10.16489/j.issn.1004-1338.2011.06.021.

18 https://www.nndc.bnl.gov/endf-b8.0/download.html

19 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 北京：原子能出版社，1986

Wu Zhihua. Experimental methods for nuclear physics[M]. Beijing: Atomic Press, 1994.

20 JAMES F D， ZIEGLER M D， Biersack J P. SRIM–The stopping and range of ions in matter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research， Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms，2010，268(11/12):1818-1823.